

# TARİHİ AHŞAP SÜTUNLU CAMİLERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE TAŞIYICI SİSTEM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Aslı ER AKAN\*

## Özet

Bu çalışmada, yapısal davranışını ve depreme karşı dayanımını belirleyebilmek için, Anadolu'daki tarihi ahşap sütunlu camilerin önemli örneklerinden biri olan Ankara Ahi Elvan Camii'nin yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi caminin yapısal performansı hakkında genel bir fikir vermiştir. Sonlu elemanlar analizi yöntemi tarihi binaların yapısal davranışını incelemek için en uygun yöntemlerden biridir. Sonlu elemanlar analizinde yapının gerçek davranışını ortaya çıkarabilmek için analitik modelleme kurallarına ve yöntemlerine uygun bir model hazırlanması çok önemlidir. Bu nedenle, doğru bir model oluşturabilmek için detaylı bir malzeme ve element araştırması yapılmalıdır. Ahi Elvan Camii'nin yapısal analizi, özellikle rijit taş duvarlar ile ahşap çerçeve strüktürü arasındaki yapısal etkileşimi açıklayan ilginç sonuçların bulunmasını sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tarihi Yapılar, Ahi Elvan Camii, Ahşap Sütunlu Camiler, Yapısal Analiz, Sonlu Elemanlar Analizi, Analitik Modelleme.

## DETERMINATION OF STRUCTURAL PERFORMANCE OF TIMBER PILLARED HISTORICAL MOSQUES BY FINITE ELEMENT ANALYSIS

### Abstract

**Abstract:** In this study timber pillared historical Ahi Elvan Mosque is analyzed in order to assess its structural behavior and seismic vulnerability. For this purpose, a full 3-D finite element analysis is performed in order to obtain a first insight into its structural performance. Finite Element Analysis is the most convenient method to examine the behavior of historic structures. In finite element analysis, rules and sequence of analytical modeling is very important in order to get the actual behavior of the building. Therefore, to create a perfect model, detailed material behavior and element behavior must be studied. Structural analysis of Ahi Elvan Mosque presented useful findings concerning structural interaction between rigid stone masonry walls and the timber framed inner structure.

**Keywords:** Historical Structures, Ahi Elvan Mosque, Timber Pillared Mosques, Structural Analysis, Finite Element Analysis, Analytical Modeling.

## 1. GİRİŞ

Anadolu'da tarihi ve kültürel değeri yüksek bir çok yapı bulunmaktadır. Geçmiş ile günümüzü birbirine bağlayan bu yapılar farklı kültürlerin deneyimlerini yansıtmaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yapıların gelecek nesillere sağlıklı bir şekilde aktarılabilmesi için korunması ve değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Günümüzde yapılan bilimsel çalışmalar ve araştırmalar bu yapıların daha iyi korunabilmesi için çeşitli yöntemler

---

\* Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Çünür Kampüsü, Isparta.  
E-mail: [aslierakan@mmf.sdu.edu.tr](mailto:aslierakan@mmf.sdu.edu.tr)

önermektedir. Bu çalışmalar arasında bilgisayar benzetimi yoluyla tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinin performanslarının belirlenmesi de önemli bir yere sahiptir. Tarihi yapıların bilgisayarla analizi diğer yapılardan daha farklı bir modelleme tekniği gerektirir. Tarihi yapıların matematiksel modellemesi, karmaşık geometrik boyutları ve taşıyıcı elemanlarının her yerinde aynı mekanik özellikleri göstermeyen malzeme karakterleri nedeniyle oldukça fazla zaman alan zor bir süreçtir.

Kültür mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapıların ve anıtların, deprem ve diğer çevresel etkilere karşı yapısal koruması için son yıllarda azımsanmayacak sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır. Taş veya tuğla taşıyıcı sisteme sahip tarihi binaların özellikle sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplarında önemli gelişmeler elde edilmiştir. Çatısı kubbe ve tonozla örtülü, ana taşıyıcı elemanlarının hepsi aynı tür malzemeden yapılmış yapıların hesap yöntemlerinde artık belirli bir standartın elde edildiği söylenebilir. Ancak, çatı örtüsü gibi ana taşıyıcı elemanlarından bazıları, oldukça rijit bir yapıda olan taş veya tuğla örgü sisteminden daha az rijitliğe sahip ahşap ya da demir gibi malzemelerden yapılmış tarihi binaların sonlu elemanlar hesabı için geliştirilen analiz modellerinin hazırlanmasında çok daha dikkatli davranmak gerekmektedir (1).

Bu çalışmada, fonksiyonu ve planı ile Anadolu'ya Türklerin getirdiği bir yapı tipi olan, dış duvarları kalın taş örgü tekniği ile yapılmış ahşap sütunlu camilerin taşıyıcı sistem performansının sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi amacıyla yapılacak hesaplar için matematiksel modelleme tekniği geliştirilmiştir. Örnek çalışma olarak seçilen Ahi Elvan Camisi'nin sonlu elemanlar hesabı yapılarak taşıyıcı sistem performansı incelenmiştir.

## 2. ANADOLU'DAKİ AHŞAP SÜTUNLU CAMİLER

Geçmişten günümüze gelen en eski yapı malzemelerinden biri olan ahşap Türkler tarafından da yaygın olarak kullanılmıştır. Anadolu'da varlığını sürdüren uygarlıkların çoğunda olduğu gibi Anadolu Selçuklu mimarisinde de ahşap vazgeçilmez yapı malzemelerinden biri olmuştur. Ahşabı Anadolu'ya gelmeden önce de kullanan Türkler ahşap yapı geleneğini Orta Asya'dan Anadolu'ya beraberlerinde getirmişlerdir. Ahşap çoğunlukla sütun, mihrab, minber, kapı, sanduka gibi mimari elemanlarda sık tercih edilen bir malzeme olmuştur. Mimari yapı elemanlarının yanı sıra taşıyıcı sistemde de kullanıldığı örnekler bulunmaktadır. Bunun en güzel örneklerinden biri de ahşap sütunlu camilerdir.

Ahşap sütunlu camilerin ilk örnekleri Arap Yarımadası, İran ve Orta Asya'da görülmektedir (2). Anadolu'da ise ahşap sütunlu cami yapma geleneği ilk olarak XIII. yüzyıl başlarında görülmeye başlanmıştır. Türkler tarafından Anadolu'ya getirilmiş olan bu cami tipi Orta Asya mimarisinin özelliğini taşımakla beraber Anadolu'da yeni gelişme alanları da bularak kendine özgü bir mimariye sahip olmuştur (3). Anadolu'da Selçuklular'dan başlayarak 19. yüzyılın sonuna kadar uzun bir gelişim süreci geçiren bu yapıların günümüze gelen en önemli örnekleri; Anadolu Selçuklu döneminden kalan Konya Sahip Ata Cami-1258 (4, 5) Afyon Ulu Cami-1272 (2), Sivrihisar Ulu Cami- 13.y.y.ın ilk yarısı (6), Beylikler döneminden kalan Beyşehir Eşrefoğlu Cami-1297 (7), kesin yapım tarihi bilinmemekle birlikte 13.y.y. da yapıldığı tahmin edilen Ankara Arslanhane Cami (6, 8), Kastamonu Kasabaköy Cami- 1367 (9), Niğde Eskiciler Mescidi-1413 (10), Osmanlı İmparatorluğu döneminden kalan Ankara Ahi Elvan Cami-1832 (8)'dir. Bu önemli örneklerle bakıldığında ahşap direkli cami geleneğinin genellikle Anadolu'nun batısında geliştiğini görmek mümkündür (11).

## 2.1 Anadolu'daki Ahşap Sütunlu Camilerin Mimari ve Taşıyıcı Sistem Özellikleri

Anadolu Selçuklu cami mimarisinin genel özellikleri ahşap sütunlu camilere de yansımıştır. Ahşap sütunlu camilerin planlama anlayışı ve örtü sistemi çok sayıda ayaklarla taşınan taş konstrüksiyonlu camilerden farklı değildir. Genelde dikdörtgen plan şemasına sahip olan bu camilerde ahşap sütunlar ve sütun başlıkları harimde nefleri bölmek için kullanılmışlardır.

Ahşap sütunlu camilerin dört duvarı da kesme taştan oluşmuştur ve diğer cami örneklerinden bu anlamda bir farkı bulunmamaktadır. Diğer camilerden en önemli farkı çatının ve çatıyı taşıyan sütunların ahşap olmasıdır. Yastıklar sahnaları bölen ve mihraba dik uzanan ahşap hatılları, bu hatıllar da mihraba paralel uzanan ahşap kirişleri taşır. Kirişlerin arasında baklavalara meydana getiren çıtalar çakılmıştır (12).

## 2.2 Örnek Çalışma Olarak Seçilen Ahi Elvan Camisi'nin Mimari ve Taşıyıcı Sistem Özellikleri

Selçuklu dönemine ait ahşap direkli camii örneklerinden biri olan Ahi Elvan Camisi Ankara'da, Atpazarı, Samanpazarı ve Koyunpazarı Sokağı'nın birleştiği noktada bulunmaktadır. 1382 yılında Ahi Elvan Mehmet Bey tarafından yaptırılmıştır (8). Yapı 396 m<sup>2</sup> lik bir alana oturmaktadır (13). 1413 yılında Çelebi Mehmet döneminde büyük onarım gören Ahi Elvan Camisi, 1967 yılında Vakıflar Genel Müdürlüğünce restore edilmiş, son olarak da 1970-1985 yılları arasında onarım görmüştür. Planı tam dikdörtgen olmayan caminin ibadet mekanı üç sıra halinde dörderli ahşap sütunla dört nefe ayrılmaktadır. Duvarlarında ikişer sıra halinde altı pencere ve mihrap duvarında da iki sıra halinde dört pencere bulunmaktadır. Camiye giriş doğu cephenin ortasındaki taş örgü ve bezemelerle süslenmiş kapıdan verilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1: Ahi Elvan Camisi'nin Genel Görünümü

Beş basamakla ulaşılan bu harim kapısı çift kanatlıdır ve üstte üçgen alınlık ile vurgulanmıştır. İki kattan oluşan mahfile çıkış ise kuzey-doğu köşede yer alan ahşap merdivenler ile sağlanmaktadır. Mahfil direklerinde altta ve üstte profilli yastıklar

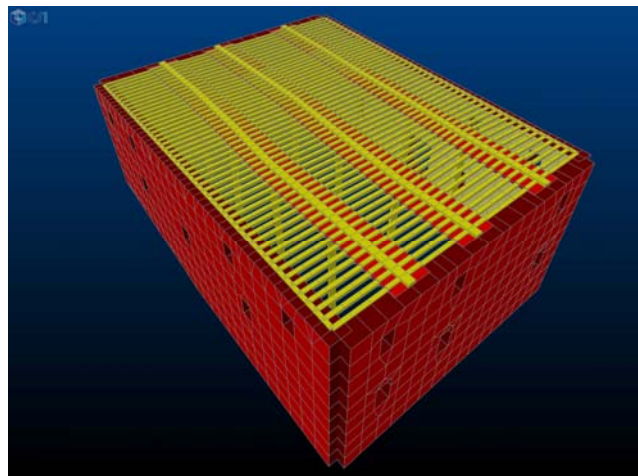
bulunmaktadır. Kuzey cephesi yamaca yaslandığı için bu cephede mahvel kapısından başka açıklık bulunmamaktadır. Duvarları tuğla ve kerpiçten yapılmış cami taş temeller üzerine oturmaktadır. En son yapılan onarımlarda duvarları tuğla örgü ile sağlamlaştırılmıştır. Kaidesi kesme taş olan tek şerefeli minarenin gövdesi ve petek kısmı tuğladan yapılmış olup yapının kuzeybatı köşesinde yer almaktadır. Toplam oniki adet ahşap sütun üzerine mihraba dikey olarak, üç sıra halinde uzatılmış iri hatıllar sütunlara devşirme başlıklar ve yastıklara oturmaktadır (Şekil 2). Hatıllar ve duvarlara enine uzatılan konsollar üzerine enine konan kirişlere tavan tahtaları çakılmıştır. Ortadaki geniş nefin tavanı iki sıra konsolla diğerlerine göre daha yüksektir (8).



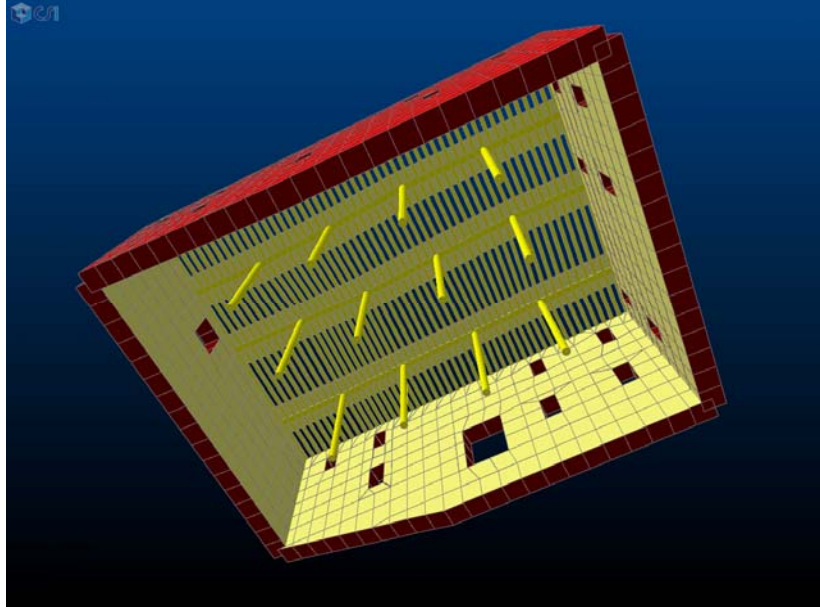
Şekil 2: Ahi Elvan Camisi'nin Ahşap Taşıyıcı Sistemi

### 3. AHİ ELVAN CAMİSİNİN SONLU ELEMENLAR MODELİ VE ANALİZİ

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak yapısal analiz programlarının kapasitelerinin artması ve grafik veri hazırlama kolaylıkları, özellikle karmaşık geometriye sahip tarihi binaların yapısal analizlerine olan talebi artırmıştır. Ancak grafik arayüz programlarıyla hazırlanan veriler analitik modelleme kurallarına dikkat edilmeden hazırlanırsa çok önemli hatalara yol açabilir. Bu nedenle, tarihi binaların sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplarında modelleme aşaması çok önemlidir.



Şekil 3: Ahi Elvan Camisi'nin Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 4: Ahi Elvan Camisi'nin Sonlu Elemanlar Modelinin İç Görünümü

Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilen Ahi Elvan Camisi'nin sonlu elemanlar modeli SAP2000 programının modelleme özellikleri ve kurallarına göre hazırlanmıştır (14). Yapının matematiksel modelinin oluşturulması için gerekli olan bütün geometrik boyutlar ve ölçüler, daha önce hazırlanmış olan rölöveler kullanılarak elde edilmiştir. Modelleme ve hesap parametreleri aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Yapının dış duvarları “genel kabuk elemanı” (SHELL) ile tanımlanmaya uygundur. Bu nedenle, 1 metre kalınlığındaki taş duvarlar SHELL elemanları ile modellenmiştir.
- Ahşap sütunlar, ana kiriş ve diğer kirişler çubuk (FRAME) elemanlarıyla modellenmiştir.
- Hesaplar için hazırlanan matematiksel model 1627 düğüm noktası, 1030 SHELL elemanı ve 1091 çubuk eleman kullanılarak oluşturulmuştur.
- Yapıyı çevreleyen taş duvarların kalınlığı yer yer 1 metreyi aştığından, iç ve dış yüzeylerdeki gerilmeleri daha detaylı hesaplayabilmek ve kesit düzlemi içindeki kayma gerilmelerini dikkate alabilmek amacıyla duvarlar modellenirken, hesaplarda kullanılan bilgisayar programının bu tür elemanların tanımlanmasına olanak verdiği “Thick Shell” seçeneği tercih edilmiştir.
- Ahşap Sütunların tepe noktasında bulunan devşirme kolon başlıklarının strüktürel fonksiyonu, ana kiriş elemanlarının uç momentlerinin serbest bırakılmasıyla (moment release) tanımlanmıştır.
- Malzeme örneği alma ve test etme olanağı bulunamadığından, yapı elemanlarının malzeme özellikleri benzer yapılar için daha önce yapılan çalışmalar sonucu üretilmiş ve uluslararası literatürde önerilen bağıntılardan yararlanılarak, yürürlükte olan Deprem Şartnamesinde yığma yapılar ve ahşap yapılar için önerilen değerler dikkate alınarak seçilmiştir.
- Taş yığma yapı elemanlarının, harç ile birlikte tek bir malzeme özelliği gösterdiği varsayılarak, elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır.
- Hazırlanan hesap modeli üzerinde, sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketinin yol açtığı zorlamaların göz önüne alındığı iki ayrı yükleme durumu

uygulanmıştır. Spektrum, EQx ve EQy yüklemesi olmak üzere ayrı ayrı iki asal doğrultuda uygulanmıştır.

- Yapının ahşap çatı bölümünün sabit yükleri hesaplanırken, ana taşıyıcı ahşap elemanlarının kendi ağırlıklarına ek olarak oturma çatının da ağırlığı dikkate alınmıştır.
- Sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, G + EQx (Sabit yükler + x eksen doğrultusundaki deprem yüklemesi) ve G + EQy (Sabit yükler + y eksen doğrultusundaki deprem yüklemesi) olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.
- Deprem etkilerinin belirlendiği spektral hesapta ilk 30 mod dikkate alınmıştır.

Ahi Elvan Cami'sinin sonlu elemanlar modelinde kabul edilen bazı malzeme özellikleri Tablo 1. de özetlenmiştir.

Tablo 1. Ahi Elvan Camisi Sonlu Elemanlar Modelindeki Malzeme Özellikleri

Eleman Tipi	Elastisite Modülü E (kN/m <sup>2</sup> )	Özgül Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Kütle (t/m <sup>3</sup> )
Taş Duvarlar (harç ile birlikte)	450000 (450 MPa)	24	2.45
Ahşap Sütunlar	9000000 (9000 MPa)	5	0.50
Ahşap Kirişler	9000000 (9000 MPa)	5	0.50

### 3. HESAP SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 3.1 Sonlu Elemanlar Hesap Sonuçlarının Değerlendirme Yöntemi

Anadolu'da bir çok örneği bulunan ahşap sütunlu camilerin taşıyıcı sistemlerinin çeşitli yük ve diğer çevresel etkiler karşısında davranışlarını belirlemek amacıyla örnek olarak seçilen Ahi Elvan Camisi'nin düşey yükler ve deprem etkisi altında hesapları yapılmıştır. Tarihi binaların sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal analizlerinin sonuçlarının yorumlanması, günümüzün mühendislik teknolojileriyle üretilen yapıların hesaplarının yorumlanmasından biraz farklılık göstermektedir. Tarihi yapılardan örnek alınarak malzeme özelliklerini belirleyecek deneylerin yapılması her zaman mümkün olmadığından, hesap sonuçlarına göre yapı elemanlarının taşıyıcı kapasitelerinin tam olarak belirlenmesi bazen çok zordur (15).

Yürürlükte olan Deprem Yönetmeliğinde, taş yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi  $f_{em}=0.3$  MPa olarak önerilmektedir (16). Ahi Elvan Cami'sinin strüktürel performansının, yapılan hesaplar sonunda elde edilen gerilmelerin emniyet gerilmeleriyle karşılaştırılması ile yorumlanması mümkündür. Hesap sonucunda elde edilen kuvvetlerde herhangi bir azaltma yapılmamıştır (R=1). Buna karşılık, emniyet gerilmeleri 3 katsayısı ile büyütülmüştür. Bu durumda, taş duvarlar için taşıma gerilmesi;

$$f_m = 0.3 \times 3 = 0.9 \text{ MPa} \quad (1)$$

olarak kabul edilmiştir.

Çekme emniyet gerilmeleri, basınç emniyet gerilmesi olarak belirlenen değerin %15'i olarak kabul edilebilir. Bu durumda, taş duvar için çekme emniyet gerilmesi;

$$f_{m(\text{çek})} = 0.9 \times 0.15 = 0.135 \text{ MPa} \quad (2)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem hesabı sonucunda ortaya çıkan kayma gerilmeleri (Kabuk elemanlarındaki S12 gerilmeleri) aşağıdaki denkleme göre hesaplanan kayma sınır gerilmesi ( $\tau_m$ ) ile karşılaştırılmıştır.

$$\tau_m = \tau_o + \mu \sigma \quad (3)$$

Bu denklemde  $\tau_m$  = kayma sınır gerilmesi ,  $\tau_o$  = çatlama emniyet gerilmesi,  $\mu$  = sürtünme katsayısı,  $\sigma$  ise duvar düşey gerilmesidir. Taş duvarlar için çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0.10 \times 3 = 0.30 \text{ MPa} \quad (4)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem yönetmeliğinde önerildiği gibi duvar düşey gerilmelerinin ilgili yapı elemanları için belirlenen basınç emniyet gerilmelerinden büyük olmadığı varsayımı ile; taş duvarlar için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0.30 + 0.5 (0.9/2) = 0.53 \text{ MPa} \quad (5)$$

olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Malzeme Grupları İçin Kabul Edilen Emniyet Gerilmeleri

Malzeme Tipi	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Emniyet Gerilmesi (MPa)	Kayma Emniyet Gerilmesi (MPa)
Taş Duvarlar ve Kemerler	0.9	0.135	0.53
Ahşap Sütun ve Kirişler	8.7	7.8	1.4

Ahi Elvan Cami'sinin yapısal analizi yukarıda belirtilen yük kombinasyonlarına göre SAP2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir (14). Bütün düğüm noktaları ve taşıyıcı elemanlarda elde edilen ötelenme, kuvvetler ve gerilmelerin tek tek incelenerek yorumlanması neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle, analiz sonuçlarının yorumu, SAP2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır. Tablo 3 ve Tablo 4'de çeşitli yük durumu ve yük kombinasyonuna göre elde edilen taban kesme kuvveti, reaksiyonlar, periyotlar ve kütle katılım oranları gösterilmiştir.

Yapının toplam ağırlığı **18066 kN**, güneybatı-kuzeydoğu (modele göre X yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti **2396 kN**, güneydoğu-kuzeybatı (modele göre Y yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altındaki toplam taban kesme kuvveti **2945 kN** olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara



göre, yapının maruz kaldığı taban kesme kuvveti x yönünde ve y yönünde toplam ağırlığının %16'sına karşılık geldiği görülmektedir.

Tablo 3. Taban Kesme Kuvvetleri ve Eksenel Kuvvetler

Yükleme tipi	Analiz Tipi	Aşama	X yönünde taban kesme kuvveti	Y yönünde taban kesme kuvveti	Düşey yönde reaksiyonlar
			kN	kN	kN
G (Düşey yük)	Doğrusal Statik				18066
EQx	Doğrusal Davranış Spektrumu	Max	2396	211	13
EQy	Doğrusal Davranış Spektrumu	Max	212	2945	204
G+Ex	Kombinasyon	Max	2396	211	18080
G+Ex	Kombinasyon	Min	-2396	-211	18053
G+Ey	Kombinasyon	Max	212	2945	18271
G+Ey	Kombinasyon	Min	-212	-2945	17862

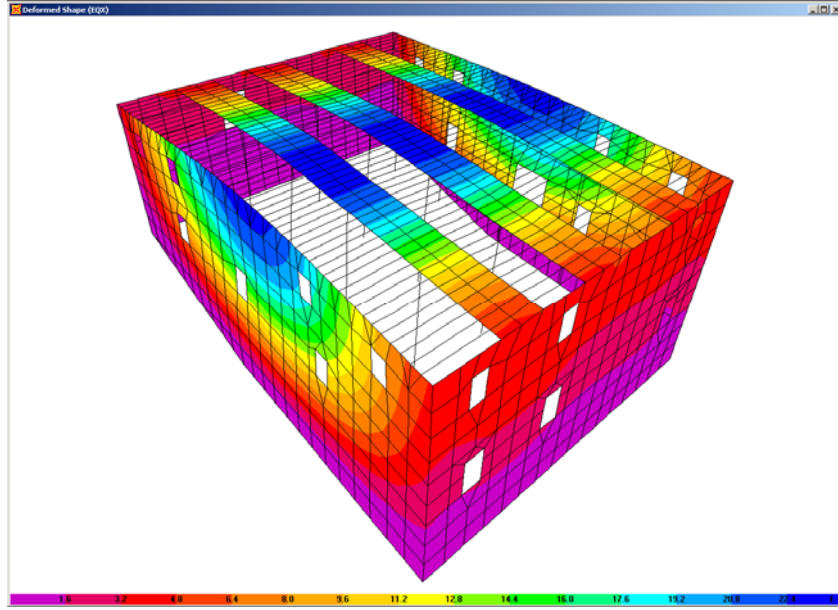
Tablo 4. Modlara Göre Periyotlar ve Kütle Katılım Oranları

Mod	Periyot (Sn)	X yönü Kütle Katılım Oranı	Y Yönü Kütle Katılım Oranı
1	0.48	0.46	0
2	0.39	0.47	0.39
3	0.29	0.47	0.39
4	0.26	0.47	0.39
5	0.25	0.47	0.39
30	0.11	0.80	0.81

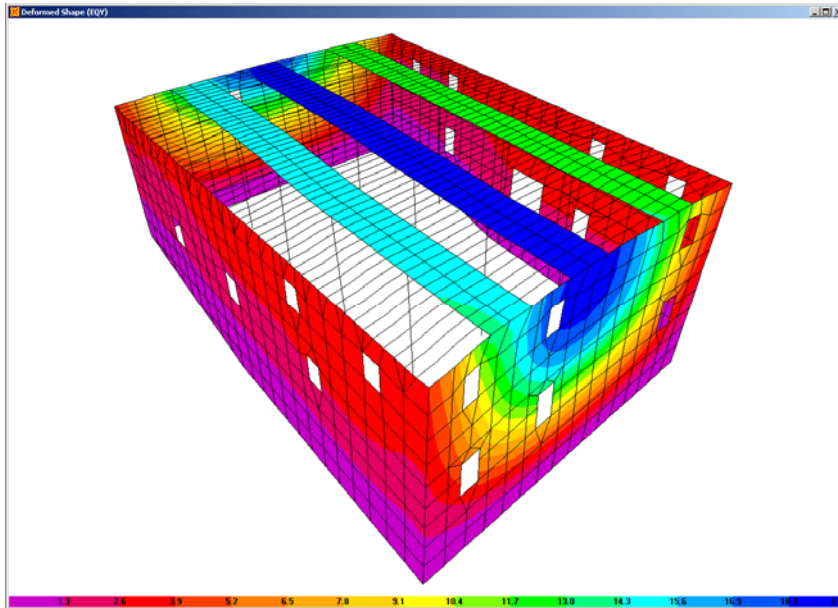
Hesap spektrumu deprem yönetmeliğinin Ankara için önerdiği deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük ötelenme değerleri çatının en üst noktasında görülmüştür. X yönündeki deprem yüklemesi sonucunda x yönündeki en büyük ötelenme Şekil 5'de görüldüğü gibi  $\Delta_x=23$  mm, Y yönündeki deprem yüklemesi sonucunda y yönündeki en büyük ötelenme ise  $\Delta_y=19$  mm'dir (Şekil 6). Ahi Elvan Camisi'nin strüktürel performansını belirlemek için yapılan sonlu elemanlar analizinin, SHELL elemanlarında hesaplanan gerilmelerden, her elemanın kendi yerel eksenine göre düşey doğrultuda (SAP2000 programının formatına göre S22 olarak tanımlanan) meydana gelen çekme veya basınç gerilmeleri ile (SAP2000 programının formatına göre S12 olarak tanımlanan) kayma gerilmeleri yapının dayanımı hakkında en açıklayıcı sonucu vermektedir. Şekil 7 ve Şekil



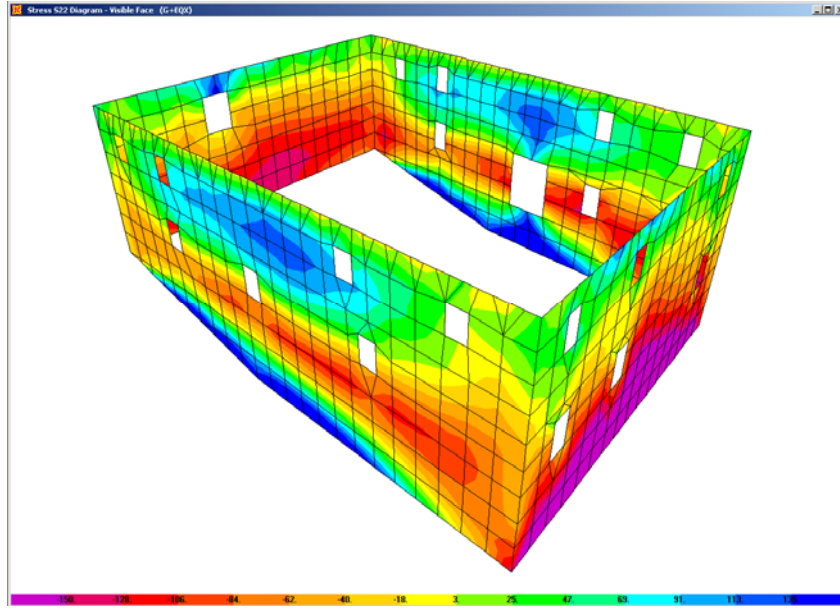
8’de sırasıyla, taş duvarlarda x ve y yönlerinde düşey+deprem yüklemesi sonucunda düşey doğrultuda düzlem içi gerilme dağılımı gösterilmiştir.



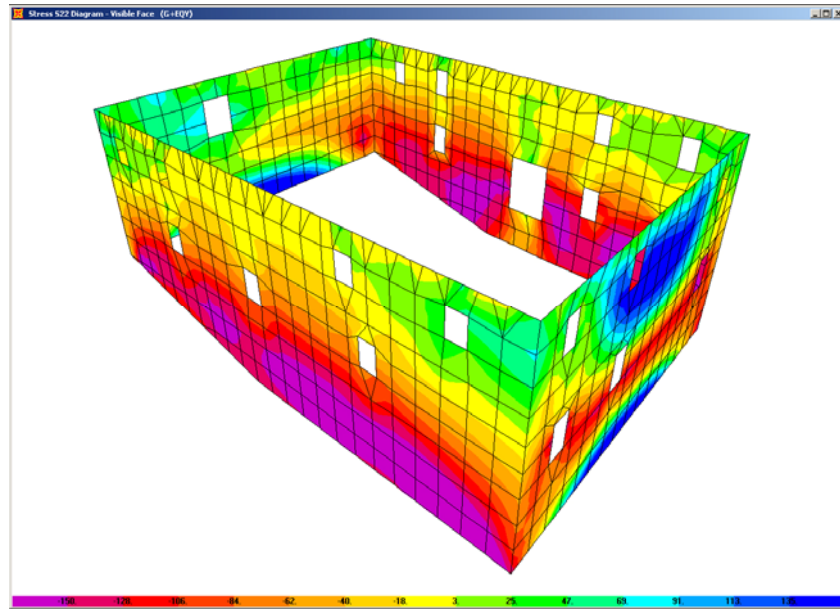
Şekil 5: X Yönündeki Deprem Yüklemesi Sonucunda Elde Edilen Yer Değiştirmeler



Şekil 6: Y Yönündeki Deprem Yüklemesi Sonucunda Elde Edilen Yer Değiştirmeler



Şekil 7: G+Ex Yükleme Sonucunda Taş Duvarlarda Hesaplanan Eksenel Gerilmeler



Şekil 8: G+Ey Yükleme Sonucunda Taş Duvarlarda Hesaplanan Eksenel Gerilmeler

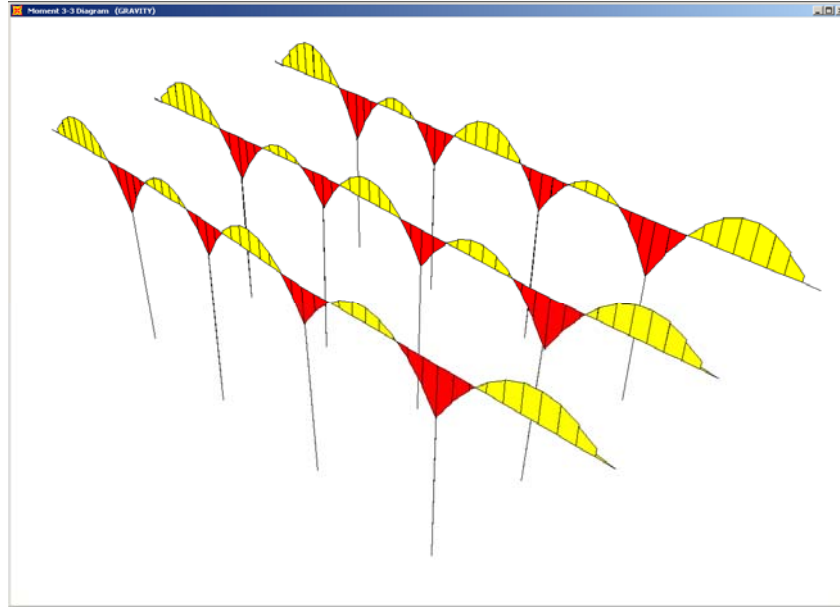
### 3.2 Hesap Sonuçlarının Deprem Davranışı Açısından Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Ahi Elvan Camisi'nin düşey yükler ve olası bir deprem karşısında yapısal davranışının incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemine göre gerçekleştirilen gerilme hesaplarının sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan ayrıntılı hesaplar sonucunda Ahi Elvan Camisi'nin olası bir deprem sırasındaki davranışı ve taşıyıcı elemanlarının karşılaştıkları etkilere karşı dayanımı ile ilgili şu gözlemler yapılmıştır.

- Ahi Elvan Camisi'nin rijit bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Hesap spektrumu deprem yönetmeliğinin Ankara için önerdiği deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük ötelenme değerleri çatının en üst noktasında, x yönünde 23 mm ve y yönünde ise 19 mm'dir. Bu noktanın zemine göre yüksekliğinin 10 m olduğu göz önüne alındığında 0.002 görelî yerdeğiştirme oranına karşı geldiğinden kabul edilebilir sınırların içinde kalmaktadır. Bu görelî yerdeğiştirme sınırında duvarlarda yapıldıkları malzemeye bağılı olarak çatlamanın ortaya çıkması beklenebilir. Ancak yıkılmanın uzak bir olasılık olduğu söylenebilir.
- Caminin yapısal performansının değerlendirilmesinde sadece en büyük yerdeğiştirme değil bütün noktalarının hangi oranlarda yerdeğiştirdiğinin bilinmesi ön plana çıkmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi çok sayıda düğüm noktasının birleştirilmesi ile elde edilen yapı modelinin öngörülen deprem etkisi altında nasıl bir performans gösterdiği yer değiştirmelerin lokal gerilmelere dönüştürülmesi ile görülebilir. Bu işlemler çeşitli gerilme bileşenleri için aşağıdaki ilgili şekillerde belirtilmektedir. Yapının genel performansı bu şekilleri dikkatlice inceleyerek cevaplandırılabilir.
- Yapısal analizler sonucunda elde edilen etkilerin incelenmesinde, Ahi Elvan Cami'sinin taşıyıcı elemanlarında Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin aşılmadığı gözlenmiştir.
- Çekme gerilmelerinin ise Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterildiği gibi, sadece boşluk köşelerinde ve duvar alt köşe bölgelerinde küçük alanlarda aşıldığı gözlenmiştir. Kullanılan elemanların ağ yapısı ve mesnet şartları gereği yatay yüklemelerde bu gerilmelerin oluşması kabul edilebilir düzeydedir.
- Yapılan gerilme hesapları sırasında, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin literatür araştırması ve mevcut yönetmeliklerde önerilen değerler doğrultusunda belirlenmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda, yapının belirli yerlerindeki olası malzeme bozulmalarının ya da taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek malzeme kayıplarının yapının davranışını etkileyebileceği söylenebilir. Ancak, elde edilen deplasmanlar ve gerilmeler kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğundan, bu tür bir varsayım sonucunda bile Ahi Elvan Cami'sinin depreme karşı dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmesi ihtimali çok zayıftır.

### 3.3 Hesap Sonuçlarının Ahşap Çerçeve Sistemi – Yığma Taş Duvar Etkileşimi Açısından Değerlendirilmesi

Ahi Elvan Camisi'nin sonlu elemanlar modeli, çok farklı rijitliğe sahip yığma taş duvarlar ve ahşap çerçeve sisteminin birleşim noktalarında yapının gerçek davranışını yansıtacak analitik modelleme kurallarına özen gösterilerek hazırlanmıştır. Oldukça rijit yığma taş duvarlar ahşap çerçeve sisteminin rüzgar ve deprem gibi yatay yüklere karşı dayanımı yeterince sağlamaktadır. Mihraba dik yöndeki ana kirişler ve mihraba paralel yöndeki diğer kirişler, düşey yükler altında da camiyi çevreleyen rijit duvarların sayesinde çerçeve davranışından daha çok sürekli kiriş özelliği sergilemektedir. Bu durumda ahşap dikmelerin Şekil 9'da görüldüğü gibi çok küçük eğilme momenti etkisinde kaldığı söylenebilir.



Şekil 9: Ahşap Taşıyıcı Sistemde Düşey Yükler Altında Moment Dağılımı

Ancak, benzer camilerde ve Ahi Elvan Camisinde de gözlendiği gibi bazı ahşap dikmelerde düşey eksenenden yana doğru eğilmeler saptanmıştır. Yapılan hesaplar, bu eğilmelerin nedeninin yatay yükler değil, çatı sisteminin duvarlarla birleşim detayları ve kirişlerin ahşap dikmelerle birleşim yerlerinde meydana gelen malzeme bozulmasından kaynaklandığına işaret etmektedir.

#### 4. SONUÇ

Tarihi binaların yapısal analizi günümüzün modern yapım tekniklerine göre üretilen yapıların yapısal analiziden farklıdır. Modelleme aşamasında eleman boyutlarının tam olarak belirlenememesi, birleşim detaylarının tanımlanamaması, malzemelerin gerçek mekanik özellikleri ve sınır gerilme değerlerinin elde edilememesi gibi belirsizlikler nedeniyle hesap sonuçlarının yorumlanmasında benzer binaların yapısal davranışlarında gözlenen deneyimler ön plana çıkmaktadır.

Anadolu’da bir çok örneği bulunan ahşap sütunlu camilerin, çatı strüktürlerini rijit bir şekilde çevreleyen masif taş duvarların, rüzgar ve deprem gibi yatay yük etkilere karşı bu tür yapıların ahşap taşıyıcı sisteminin yüz yıllar boyunca sağlam kalabilmesini sağladığı düşünülmektedir.

Oldukça ağır bir kütlesi olan konsol taş duvarların deprem dayanımı belirleyen en önemli kriter duvarın serbest yüksekliğidir. Anadolu’daki ahşap camiler incelendiğinde, yüksek deprem riski olan bu topraklarda, ahşap direkli camilerin duvar yüksekliğinin belki de depremler sonucunda yaşanan deneyimler nedeniyle gereğinden fazla kalınlıkta inşa edildiği bile söylenebilir.

Basit bir forma sahip ahşap taşıyıcı sistemlerin düşey yükler altındaki yapısal davranışını yorumlamak için temel statik bilgisi bile yeterlidir. Rijit taş duvarlar sayesinde, çatıyı oluşturan kirişlerin çerçeve sistemi yerine sürekli kiriş gibi davrandığı söylenebilir. Bu durumda ahşap dikmelerin de sadece eksenel yük taşıyan elemanlar olduğu kabul edilebilir. Ahşap dikmelerin, boyları nedeniyle ortaya çıkacak bir burkulma problemi olmadığı sürece

önemli bir eğilme momentine maruz kaldıkları söylenemez. Anadolu'daki çeşitli örneklerde de görüldüğü gibi, ancak aşırı kar nedeniyle ya da sonradan yapılan değişikliklerden dolayı düşey yüklerde meydana gelen artışa paralel olarak burkulmadan dolayı meydana gelen ikinci mertebe momentlerinin, ahşap direklerde eğilmeden dolayı hasar oluşturabileceği söylenebilir.

Ahşap sütunlu tarihi camilerin taşıyıcı sistemlerinin yukarıda tanımlanan performans özelliklerinden dolayı, deprem ve rüzgar gibi doğal olayların neden olduğu yatay yükler karşısında önemli bir zayıflığı gözlenmemiştir. Ahşap taşıyıcı sisteminin de basit geometrik biçimden dolayı düşey yükler altında da yapısal performansı iyi durumdadır. Ancak, bu tür camilerin yapısal performansını iyi bir şekilde sürdürebilmeleri için, özellikle ahşap yapı elemanlarının malzeme özelliklerinin ve bağlantı detaylarının bozulmamasına çaba harcanmalı ve iyi korunmalıdır.

#### 4. KAYNAKLAR

1. Ünay, A.İ., Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşliği, Ankara, 2002.
2. Bayhan, A. A. Ordu'dan Bazı Tarihi Ahşap (Çantı) Camiler, Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi (The Journal of International Social Research), Volume2/7, 2009.
3. Kuran, A. Anadolu'da Ahşap Sütunlu Selçuklu Mimarisi, Malazgirt Armağanı, Ankara, s.179-186, 1972.
4. Karamağralı, H., 1982, "Sahipata Caminin Restitüsyonu Hakkında Bir Deneme", Röleve Restorasyon Dergisi, S.3, Ankara, s.49-76, 1982.
5. Sönmez, Z. Başlangıcından 16. Yüzyıla Kadar Anadolu Türk-İslam Mimarisinde Sanatçılar, Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara, 1995.
6. Aslanapa, O., Anadolu'da ilk Türk Mimarisi, Türk Tarih Kurumu, Ankara, 1991.
7. Erdemir, Y., Beyşehir Eşrefoğlu Süleyman Bey Camii ve Külliyesi, Beyşehir, 1999.
8. Öney, G., Ankara'da Türk Devri Dini ve Sosyal Yapıları, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih -Coğrafya Fakültesi Yayınları, s. 20-29, Ankara, 1971.
9. Akok, M., "Kastamonu'nun Kasaba Köyünde Candarlıoğlu Mahmud Bey Camii", Belleten, C.X, S. 38, Nisan, s.293-302., Ankara, 1946.
10. Çal, H., Niğde Şehrindeki Ahşap Tavanlı Camiler ve Mescidler, s.3-10, Ankara, 2000.
11. Kuban, D., Selçuklu Çağında Anadolu Sanatı, Yapı Kredi Yay., İstanbul, 2002.
12. Kültür Ve Turizm Bakanlığı, Ankara Kültür Ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu, 9.9.2005 gün ve 829 sayılı karar, 2005.
13. Hürriyet Ahi Elvan Cami, (12.10.2006)  
<http://hurarsiv.hurriyet.com.tr/goster/haber.aspx?id=5241265>

14. Computers and Structures Inc. SAP2000, Structural Analysis Program; Ver.10.0, Berkeley, California, USA, 2002.
15. Ünay, A. I., Evaluation of Structural Safety of Historical Masonry Buildings, Architectural Science Review, Volume 50-11, s. 26-30, 2007.
16. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.